

СУПЕРГИДРОФОБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ: ОБЗОР

М. Нажипкызы^{1,2}

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыр, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, пр. аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан

Предисловие

Настоящая публикация посвящается выдающемуся исследователю, одному из ведущих ученых в области химической физики и нанотехнологии профессору З.А. Мансурову. В 2010 году по предложению Зулхаира Аймухаметовича в ходе выполнения кандидатской диссертации мною были начаты экспериментальные исследования в области синтеза супергидрофобной сажи. За последние 10 лет нами получены результаты по синтезу наноматериалов с гидрофобными свойствами в пламени, получению гидрофобного песка, созданию антиобледенительных покрытий, исследованию влияния гидрофобного песка на рост растений, созданию лакокрасочных покрытий на основе гидрофобной сажи.

АННОТАЦИЯ

Способность супергидрофобных поверхностей оставаться сухими, самоочищаться и избегать биообрастания является привлекательной для применения в строительстве, сельском хозяйстве и т.п. Наши исследования показывают, что сажа, полученная при определенных условиях сжигания углеводородного топлива, обладает супергидрофобным свойством и может быть применена в качестве наполнителя при создании гидрофобных покрытий. Приобретенная поверхность имеет уменьшенную площадь контакта между подложкой и жидкостью, из-за чего капли жидкости будут легко скатываться с поверхности. Благодаря этой возможности к скатыванию, такая высокоотталкивающая поверхность обладает свойством самоочищения. В данной статье представлен обзор работ по получению наноматериалов в пламени, созданию супергидрофобного песка на основе порошка, полученного при сжигании силиконовых отходов, созданию антиобледенительных покрытий, исследованию влияния гидрофобного песка на рост растений, созданию лакокрасочных покрытий на основе гидрофобной сажи.

Ключевые слова: покрытия, антиобледенение, гидрофобный песок, угол смачивания, силиконовые отходы, сжигание.

1. Введение

Смачивание поверхности имеет большое значение для характеристики и применения материалов. Супергидрофобные поверхности отталкивают воду, как правило, из-за текстуры поверхности или химических свойств. Удивительные возможности применения супергидрофобных поверхностей привели к увеличению внимания к супергидрофобности в последние десятилетия.

С момента открытия супергидрофобных параметров листа лотоса значимые научные и промышленные усилия были предприняты для имитации поверхности листа лотоса.

Самоочищение – одна из самых характерных черт супергидрофобных поверхностей. Однако до сих пор неясно в деталях, как работает самоочищение и какие силы участвуют в этом процессе. Чтобы получить полное представление, важно визуализировать процесс самоочистки в микрометрическом масштабе. Устойчивость супергидрофобных поверхностей к твердым частицам и наноразмерным загрязнениям необходима при использовании этих поверхностей для множества реальных приложений.

Способность супергидрофобных поверхностей оставаться сухими, самоочищаться и избегать биообрастания привлекательна для

применения в различных отраслях науки и технологии, таких как строительство, сельское хозяйство, биотехнологии, медицина и теплопередача [1-4]. Капли воды, контактирующие с этими поверхностями, должны иметь большие видимые углы контакта (более 150 °С) и малые углы скатывания (менее 10 °С). Это может быть реализовано для поверхностей, которые имеют химический состав с низкой поверхностной энергией и микро- или наноразмерную шероховатость поверхности, сводя к минимуму контакт между жидкостью и твердой поверхностью [5]. Однако шероховатые поверхности, у которых лишь небольшая часть общей площади контактирует с жидкостью, испытывают высокое локальное давление при механической нагрузке, что делает их хрупкими и очень восприимчивыми к истиранию. Кроме того, истирание обнажает нижележащие материалы и может изменить локальную природу поверхности с гидрофобной на гидрофильную, что приведет к прикреплению капель воды к поверхности.

Наблюдения за естественными поверхностями, такими как лист лотоса, показывают, что иерархически структурированные поверхности, которые обладают многомасштабной шероховатостью, полезны для создания супергидрофобных поверхностей по сравнению с поверхностями с одной текстурой. Это связано с тем, что площадь контакта твердого тела с жидкостью на иерархически структурированных поверхностях значительно меньше, чем на поверхности с одной текстурой. Кроме того, авторы работ [6-7] продемонстрировали, что стабильность супергидрофобного состояния можно повысить, структурируя поверхности с помощью микро- и наноразмерной шероховатости. Шероховатость в микромасштабе уменьшает площадь контакта твердого тела с жидкостью, в то время как нано-шероховатость помогает поверхности выдерживать давление, необходимое для поддержания состояния Кэсси-Бакстера [8].

Фундаментальные свойства смачивания, постулированные Кэсси-Бакстером и Венцелем, были изучены для проектирования и разработки разных типов гидрофобных поверхностей для широкого диапазона применений.

На сегодняшний день материалы с гидрофобными поверхностями пользуются огромным спросом и могут быть использованы в широком диапазоне от ежедневных продуктов до более сложных случаев, таких как борьба с обледенением, загрязнением в трубах, запоте-

ванием, повышение эффективности теплообменного оборудования и т.п. [9-13].

Ограниченный доступностью идеальных натуральных шаблонов и простыми процедурами изготовления, простой, недорогой, масштабируемый и экологичный метод покрытия пользуется большим спросом во все времена. Чтобы удовлетворить эти потребности авторы работ [14-16] исследовали нетрадиционную технологию изготовления супергидрофобных покрытий, основанную на контролируемой спонтанной реакции органосиланов со стехиометрическим количеством воды в условиях контролируемой температуры окружающей среды.

На сегодняшний день ряд глобальных научных центров и научно-исследовательские отделы ряда крупных производителей интенсивно проводят исследования в области создания супергидрофобных материалов и покрытий с различными функциональными свойствами.

2. Синтез наноматериалов с гидрофобными свойствами в пламени

Исследования, проведенные нами в Институте проблем горения, показывают, что полученная сажа обладает супергидрофобными свойствами, которая идеально подходит для создания гидрофобных покрытий. Главным недостатком сажи является то, что при взаимодействии с водой она теряет свои гидрофобные свойства. Однако, сажа, полученная при определенных условиях сжигания топлив, сохраняет гидрофобные свойства после взаимодействия с водой, и ее можно использовать для придания различным материалам гидроизоляционных свойств. Нами проведены работы по выявлению оптимальных условий повышения гидрофобных свойств углеродных наноматериалов (сажа, нанотрубки, углеродные волокна) при сжигании и пиролизе попутных газов нефтяных месторождений [17].

Методика быстрого осаждения углеродного слоя была предложена И.К. Пури [18]. Предложенный метод дает возможность синтезировать крупные агрегаты, состоящие из нанобиосеров с диаметрами от 20-50 нм [18], а также получать более крупные частицы. Авторы работ [19] исследовали ацетиленовое пламя, где в качестве катализатора применялся никель.

Имеются много составов органических покрытий, которые используются для защиты от коррозии. В частности, было показано, что

гидрофобные и супергидрофобные покрытия обеспечивают хорошую защиту благодаря улучшенной способности покрытия замедлять перенос воды и ионов и быть устойчивыми к атмосферным воздействиям [20].

В работах, выполненных в Институте проблем горения [21-23], приведены результаты исследования синтеза супергидрофобной сажи при горении углеводородов. Основным недостатком сажи является то, что ее взаимодействие с водой инициирует подвижность наноструктурных составляющих углерода и образующиеся новые структуры приводят к потере гидрофобных свойств.

Однако, если сажу синтезировать при определенных условиях сжигания углеводородных топлив, то она не теряет гидрофобные свойства после взаимодействия с водой, и такая сажа успешно применяется для придания различным материалам водостойкости и непромокаемости.

При горении пропан-кислородной смеси сажа осаждалась на поверхность кремниевой подложки (рис. 1).

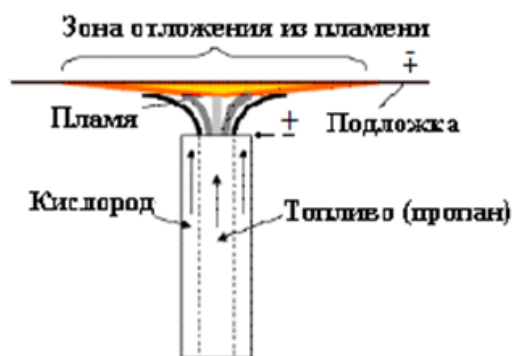


Рис. 1. Схематическое изображение горелки для синтеза сажи.

Результаты показали, что синтезированная сажа обладает супергидрофобными свойствами. В работах [23, 24] были проведены исследования по применению полученной сажи для создания гидрофобных композиций.

3. Получение гидрофобного песка

В последние десятилетия в мире наблюдается спрос на гидрофобные материалы, так как такие материалы обладают исключительными функциональными свойствами, такими как водонепроницаемость, стойкость к биокоррозии, к загрязнениям органического и неорганического происхождения [25]. Благодаря

таким свойствам преимущества использования таких материалов в быту и в технологии очевидны. Например, при попадании воды в строительные конструкции происходит их коррозия и деформация. Для традиционных материалов такое разрушение связано, прежде всего, с воздействием напряжений, вызванных попаданием воды в дефекты и трещины поверхностного слоя материала и ее последующем замораживании [26]. Однако эту проблему можно решить с помощью гидрофобных материалов, таких как, кирпич, бетон, штукатурка, гипс, асбоцемент. В состав всех видов строительных растворов, бетонов, асфальтобетонов входит песок. Он также используется в виде песчаной «подушки» при возведении фундаментов зданий, в дорожно-строительной отрасли и при укладке брусчатки и тротуарной плитки и т.д. Поэтому актуальной задачей является придание песку гидрофобных свойств. Песок с такими свойствами находит применение не только в строительстве, но и сможет решить проблему острой нехватки воды во многих регионах.

Таким образом, созданный гидрофобный песок можно использовать для предотвращения проникновения воды в нижние слои почвы в целях экономии поливной воды [21, 27-29].

Одной из самых серьезных экологических проблем для морских территорий является разлив нефти, поэтому необходимо найти подходящий метод отделения разливов нефти от воды. Для разделения масла и воды одностадийным методом нами был создан гидрофобный песок с углом смачивания 134° . Созданный песок, покрытый сажей, был исследован физико-химическими методами: сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного рентгеновского излучения, рамановской и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [30].

Сначала песчинки просеивали (диаметр: 250-500 мкм), затем промывали дистиллированной водой и этанолом и сушили в печи при 60°C в течение 2 часов. Частицы песка подвергались воздействию пламени горелки с керосином в качестве топлива в течение примерно 18 мин для осаждения частиц сажи на песке.

Предложенный метод [30] прост, быстр и позволяет создать гидрофобный песок в больших количествах. Поверхность песок/сажа имеет шероховатость на микро- и наноуровне, что соответствует водоотталкивающим свойствам. Созданный песок/сажа способен отделять различные виды углеводородов, таких

как керосин, газоль, моторное масло, от воды благодаря своим гидрофобным свойствам.

Для создания гидрофобного песка нами был разработан метод синтеза нанодисперсного супергидрофобного порошка в процессе сжигания отходов силиконовых материалов. Разработанный метод получения нанодисперсного порошка является простым. В основе метода лежит способ сжигания силиконовых отходов (подставки из силикона, разные формы из силикона). В результате образуется



(a)



(б)

Рис. 2. Сжигание отходов кремнийорганических полимерных соединений (а), полученный супергидрофобный порошок (б).

Полученный гидрофобный агент использовался для создания сыпучего гидрофобного материала на основе кварцевого песка, представляющего собой на 85-90 мас.% диоксид кремния. Песок предварительно очищался, просеивался, выбиралась фракция 0,5-1 мм.

Далее его просушивали при температуре 50-70 °С. Созданный песок интенсивно перемешивали с синтезированным гидрофобным агентом в мешалке со скоростью 300 об/мин в интервале от 4 до 6 мин. Роль гидрофобного порошка заключается в повышении степени адгезии гидрофобной пленки на поверхности песчинок. Предварительно готовили смеси гидрофобного агента и песка в следующих соотношениях: 0,5:100; 0,75:100; 1:100; 1,25:100; 1,5:100; 1,75:100; 2:100.

В результате проведенных исследований был создан сыпучий материал, характеризующийся хорошими водоотталкивающими свойствами и стойкостью. Угол смачивания полученного материала измеряли на аппарате KRUSS. Первоначально полученные смеси гидрофобного агента и песка прессовались в виде таблеток. Далее на поверхность таблетки размещалась капля воды в объеме ~2 мкл. Высокоскоростная камера записывает процесс формирования капли на поверхности, что позволяет получать макроснимки поверхности. С помощью математической калькуляции и программы Advance методом лежащей капли были рассчитаны точные углы смачивания [29].

Одним из факторов, определяющих угол смачивания наряду с природой поверхности является удельная поверхность. Данные исследования удельных характеристик речного песка, гидрофобного агента и гидрофобного песка представлены в таблице 1. Удельную поверхность определяли методом БЭТ (Брунауэр-Эммет-Тейлор).

По результатам БЭТ анализа удельная поверхность гидрофобного песка составляет среднее значение между гидрофобным агентом и гидрофобным песком.

Для исследования стабильности водоотталкивающих свойств полученного гидрофобного песка проводили экспериментальные работы в лабораторных условиях. Гидрофобный песок изготовленный в различных соотношениях силиконовой золы и песка высыпали в стакан воды. При погружении гидрофобного песка в воду, он плавает на поверхности воды и не

Таблица 1. Результаты анализа измерения удельной поверхности исследуемых образцов

Вещество	Удельная поверхность, м ² /г	Удельный объем пор, см ³ /г	Средний размер пор, нм
Речной песок	1,672	0,001	-
Гидрофобный агент	87,277	0,037	1,713
Гидрофобный песок	60,517	0,026	1,713

тонет. Испытания показали, что созданный гидрофобный песок длительное время остается сухим и не теряет свое гидрофобное свойство (эксперимент длился до 30 суток). Только образец с низким содержанием гидрофобного агента (0,5:100) на 29 день терял гидрофобное свойство.

Созданный гидрофобный песок можно использовать в качестве наполнителя в строительных материалах для наружной отделки и в сельском хозяйстве для предотвращения просачивания поливной воды в нижние пласты грунта или ее испарения. Также гидрофобный песок может быть использован для изоляции грунта вокруг растений от соленой почвы и соленых подземных вод, приводящих к разрушению корневой системы растений.

4. Антиобледенение

Обледенение поверхности всегда было проблемой. Лед может нанести большой ущерб оборудованию и установкам, поэтому большой интерес представляет предотвращение обледенения. Пассивные ледофобные покрытия – один из способов препятствовать образованию льда. Гидрофобные поверхности ограничивают количество воды, доступной для зародышеобразования и образования льда. Структура поверхности важна для минимизации площади контакта с водой, а иерархические структуры могут давать супергидрофобные поверхности. В реальных условиях всегда будет присутствовать некоторое количество воды, и из-за образовавшегося льда предпочтительны поверхности с низкой адгезией льда. Противообледенительная поверхность сочетает в себе эти свойства: обеспечивает высокую степень водоотталкивания, задерживает образование льда и демонстрирует низкую адгезию льда. Наконец, механические свойства и долговечность таких покрытий имеют огромное значение для обеспечения их функциональности на протяжении всей жизни.

Антиобледенительное свойство материала напрямую зависит от гидрофобных свойств поверхности. Разработанный метод сжигания не требует дополнительных энергетических затрат и позволяет получать нанодисперсный порошок с углом смачивания свыше 155° . Таким образом, разработан метод, позволяющий простым сжиганием получать бело-серого цвета нанодисперсный порошок, который не обладает запахом и не оказывает вредного воздействия на кожу.

На рис. 3 представлен полученный супергидрофобный порошок с каплями воды на его поверхности, полученный сжиганием отходов силиконовых материалов и растертый тонким слоем на поверхности картона. Поведение капель воды на его поверхности показывают исключительное гидрофобное свойство порошка. Это испытание показывает, что для придания поверхности гидрофобного свойства достаточно малого количества порошка в качестве расходного материала.



Рис. 3. Капли воды на поверхности порошка, полученного из силиконовых отходов.

Полученный композиционный материал обладает высокой адгезией к металлам, дереву, картону и стеклу. Проведены испытания по обдуву водной аэрозолю покрытия нанесенного на поверхность дюралюминиевой пластины при температуре -5°C . Результаты исследований показали, что ледяной коркой покрывается около 20% поверхности, при этом небольшое силовое усилие приводит к отделению ледяной корки от поверхности.

Выбранный нами образец представляет собой 2D крыло с аэродинамической поверхностью NASA 0021. Крыло состояло из двух компонентов, таких как основное тело для крыла из алюминиевого листа и заменяемая вкладка. Центральная часть основного тела спроектирована так, чтобы можно было вставить испытуемый образец, рис. 4.

Исследования показали, что антиобледенительные покрытия дают много преимуществ, таких как значительное снижение расхода тепловой энергии, необходимой для освобождения переднего края крыла от льда (экономия энергии до 80%).

Таким образом, антиобледенительные покрытия работают как защита от замерзания. В мороз самолет, взлетно-посадочная полоса и дорожное покрытие должны быть свободны



Рис. 4. Фотографии экспериментальной установки и капель воды на антиобледенительном покрытии [23].

от снега и льда перед стартом. Отсутствие обледенения воздушных судов снижает вес самолета и предотвращает неблагоприятную аэродинамику, что отражается в снижении цен и обеспечивает высокие стандарты качества и безопасности.

В основе гидрофобных и антиобледенительных покрытий лежит регулярная структура из частиц субмикронного и нанометрового размера, выступов или острий, располагающихся подобно лесу на поверхности. Пространство между этими элементами занимает воздух или любой другой газ из атмосферы. Подобные поверхности получают химическим или ионным травлением.

Результаты показывают, что использование покрытия может значительно снизить расход энергии для нагрева поверхностей, подверженных обледенению. Например, для эффективной работы аэродинамических поверхностей системы обледенения требуют, чтобы они работали полностью в качестве испарительных систем, поэтому жидкая вода испаряется на нагреваемой поверхности, а не течет вниз, что предотвращает накопление капляющего льда. Если используются покрытия, требуется гораздо меньшее количество энергии, поскольку энергия нагрева передается только для поддержания температуры выше

температуры замерзания в области скопления капель воды и подвода скрытого тепла, необходимого для испарения воды [23].

5. Исследование влияния гидрофобного песка на рост растений

Созданный гидрофобный песок использовали в качестве подстилочного слоя для сохранения влаги в верхних слоях песчаных грунтов при выращивании корнеплодных овощей. Гидрофобный песок крупной фракции рекомендуется для засыпки полов в подвальных помещениях зданий для поддержания сухого пола в подвалах.

В исследованиях использовали однолетние растения, гипераккумуляторы тяжелых металлов (ТМ) *A. paniculatus*, и подсолнечника (*Helianthus annuus*) – травянистые растения с мощной корневой системой и надземной частью, с интенсивным ростом и высокой продуктивностью биомассы. Эти виды растений используют в технологии для очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) (*Phytoremediation*), где проявляется их природная способность аккумулировать в клеточных органеллах корня, стебля и листьев ионы тяжелых металлов в виде различных нетоксичных для растений комплексов.

Влияние гидрофобного песка (ГП) на рост растений амаранта и подсолнечника определяли в следующих опытах. Горшки для выращивания растений наполняли смесью вермикулит/обычный речной песок (1:1)/гидрофобный песок (10%) по весу. В контроле использовали смесь вермикулит/речной песок (1:1). Поливали отстоянной водой без хлора в обычном режиме. Оценивали всхожесть семян, высоту растений и их габитус. Результаты опытов показали (рис. 5), что гидрофобный песок, полученный на основе сажи, смешанный с обычным речным песком (10%), практически не влияет на рост проростков и в течение вегетации отрицательного воздействия на растения не наблюдалось.

В рамках работ по практическому применению разрабатываемого гидрофобного песка на основе супергидрофобной сажи был разработан и создан эластичный гидрофобный саморазрушающийся ковер на основе гидрофобного песка. Исследования включали выбор саморазрушающегося подстилочного материала и разработку способа закрепления на поверхности саморазрушающегося подстилочного материала слоя гидрофобного песка.

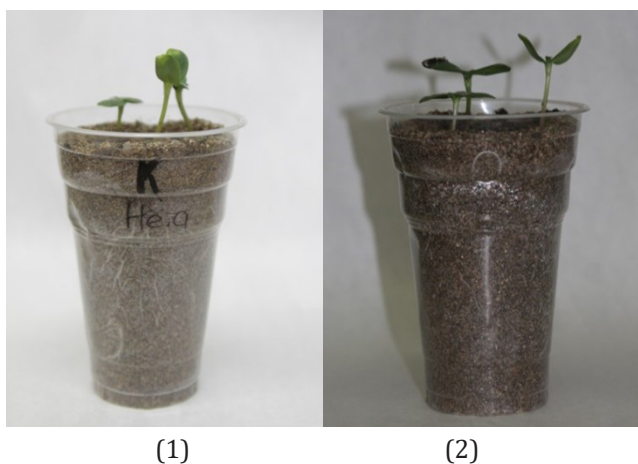


Рис. 5. Влияние гидрофобного подстилочного песка на рост подсолнечника: (1) – контроль, (2) – опыт (смесь ГП (10%) с обычным речным песком).

На рис. 6 приведена фотография урожая картофеля, полученного с применением в качестве подстилочного слоя ковра из гидрофобного песка (рис. 6а) и контрольного образца (рис. 6б) [31].

Таким образом, применение в качестве подстилочного слоя гидрофобного песка сохраняет влагу и в 2 раза снижает количество воды, необходимое для выращивания картофеля.



Рис. 6. Фотография картофельного урожая: (а) – стандартный образец; (б) – с применением гидрофобного песка.

Таблица 3. Краевые углы смачивания образцов на разных основаниях

№ Образца	Полиуретан, г	Растворитель, г	Сажа, г	Основание	Угол смачивания, θ
1	5,00	20,00	1,00	стекло	93,50
2	4,00	30,00	2,00	бумага	133,00
3	4,00	40,00	3,00	бумага	144,90

6. Создание лакокрасочных покрытий на основе гидрофобной сажи

Полиуретановый лак и растворитель «646» перемешивались механически, затем в полученную суспензию добавлялась гидрофобная сажа (пропорции взяты в соответствии с таблицей 2). Гидрофобную сажу синтезировали путем наложения электрического поля (1 кВ) при горении смеси пропана, бутана и изобутана. Полученную смесь гомогенизировали в ультразвуковом диспергаторе при мощности 600 Вт в течение 30 мин.

Полученные образцы наносились на куски бумаги и стекла, затем сушили в течение 30 мин, после чего созданные покрытия исследовали методом сидящей капли с помощью прибора DSA25 KRUSS. Результаты приведены в таблице 3.

На рис. 7 виден угол смачивания образца лака №3.

Таблица 2. Образцы с разным составом полиуретана, растворителя и сажи

№	Полиуретан, г	Растворитель, г	Сажа, г
1	5,00	20,00	1,00
2	4,00	30,00	2,00
3	4,00	40,00	3,00

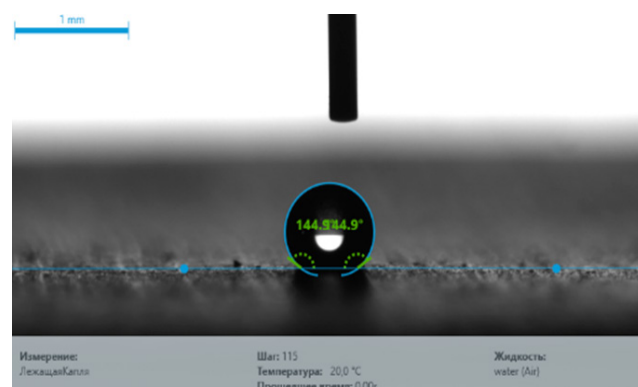


Рис. 7. Краевой угол смачивания лака образца №3 на поверхности бумаги.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что лак состава №3 показал максимальную гидрофобность. Далее этот же лак нанесли на дерево и на металлическое основание и измерили углы смачивания. Также были измерены углы смачивания самого дерева, металла и полиуретанового покрытия. Результаты измерений показаны в таблице 4.

Таблица 4. Результаты углов смачивания образца лака №3 на поверхности металла и дерева

Основание	Угол смачивания θ , °	Угол смачивания θ , ° (с лаком №3)
Металл	29,90	138,50
Дерево	36,70	138,30

При вводе наноструктурированной сажи в смесь полиуретана с растворителем «646» были получены гидрофобные покрытия для различных материалов, таких как дерево, металл и бумага. Было определено оптимальное соотношение полиуретана и сажи, равное 4:3. Результаты определения краевого угла смачивания показали $\sim 145^\circ$.

7. Заключение

В данном обзоре приведены результаты по получению наноматериалов в пламени: создан супергидрофобный песок на основе порошка, полученного при сжигании силиконовых отходов, показана возможность создания антиобледенительных покрытий, исследовано влияние гидрофобного песка на рост растений, созданы лакокрасочные покрытия на основе гидрофобной сажи. Разработанные гидрофобные покрытия на основе наноматериалов обладают такими полезными свойствами, как стойкость к засорению, обледенению, коррозии, обеспечивают смазывание и обладают способностью отделять воду от масла.

Таким образом, разработка и создание супергидрофобных покрытий представляет значительный практический интерес.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант AP08856321).

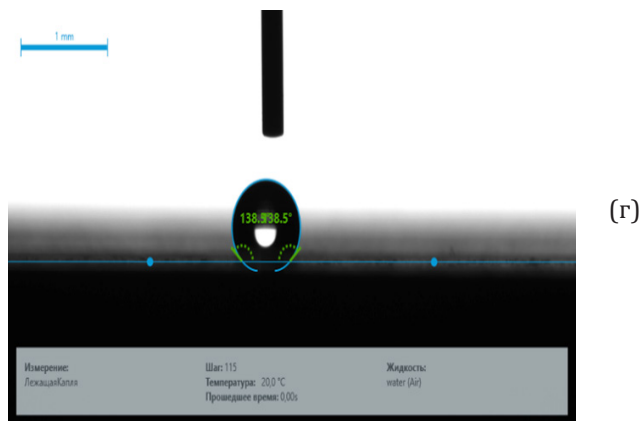
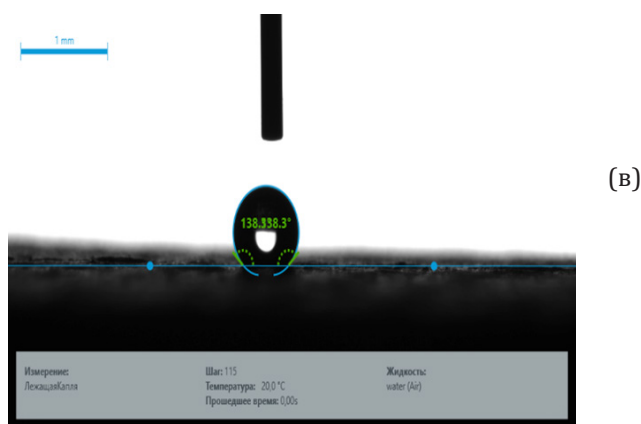
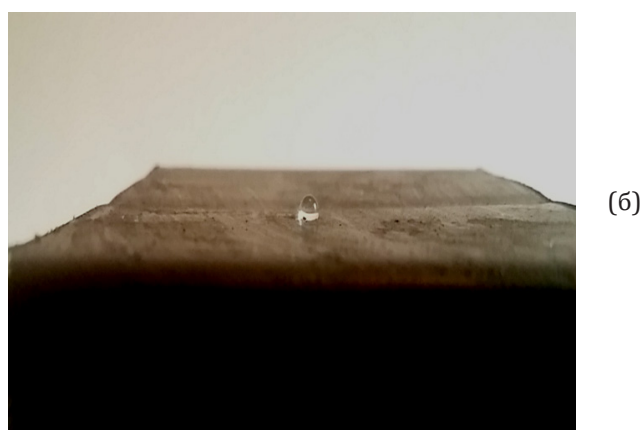


Рис. 8. Капля воды на поверхности лака №3, нанесенного на дерево (а) и металл (б), а также их краевые углы смачивания (в, г).

Литература

- [1]. Athauda T., Ozer R., Investigation of the effect of dual-size coatings on the hydrophobicity of cotton surface // *Cellulose*. – 2012. – Vol.19, №3. – P.1031–1040.
- [2]. Bhushan B. Biomimetics: lessons from nature—an overview // *Phil. Trans. R. Soc. A* 367. – 2009. – Vol.367, №1893. – P.1445-1486.
- [3]. Celia E., Darmanin T., Taffin de Givenchy, E., Amigoni, S., Guittard, F. Recent advances in designing superhydrophobic surfaces // *J. Colloid Interface Sci.* – 2013. – Vol.402. – P.1-18.
- [4]. Crick C., Parkin I. Water droplet bouncing—a definition for superhydrophobic surfaces // *Chem. Commun.* – 2011. – Vol.47, №44. – P.12059-12061.
- [5]. Wang D., Sun Q., Hokkanen M.-J., Zhang C. and at all. Design of robust superhydrophobic surfaces // *Nature*. – 2020. – Vol.582. – P.55-59.
- [6]. Kota A., Li Y., Mabry J., Tuteja A. Hierarchically structured superoleophobic surfaces with ultralow contact angle hysteresis // *Adv. Mater.* – 2012. – Vol.24, №43. – P.5838-5843.
- [7]. Kim J., Choi S.-O. Waterproof and Water Repellent Textiles and Clothing // *The Textile Institute Book Series, Chapter*. – 2018. – Vol.11. – P.267-297.
- [8]. Yildirim Erbil H., Elif Cansoy C. Range of Applicability of the Wenzel and Cassie-Baxter Equations for Superhydrophobic Surfaces // *Langmuir*. – 2009. – Vol.25, №24. – P.14135-14145.
- [9]. Sethi S.K., Manik G. Recent progress in super hydrophobic / hydrophilic self-cleaning surfaces for various industrial applications: a review // *Poly Plast Technol Eng.* – 2018. – Vol.57, №18. – P.1932-1952.
- [10]. Chermahini S.H., Ostad-Ali-Askari K., Eslamian S., Singh V.P. Recent progress in self-cleaning materials with diferent suitable applications // *Am J Eng Appl Sci.* – 2018. – Vol.11, №2. – P.560-573.
- [11]. Fortin G. Super-Hydrophobic coatings as a part of the aircraft ice protection system // *SAE International. Unites States*, 2017.
- [12]. Lin Y., Chen H., Wang G., Liu A. (2018) Recent progress in preparation and anti-icing applications of superhydrophobic coatings // *Coatings*. – 2018. – Vol.8, №6. – P.208-241.
- [13]. Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Ковалев О.Б. Высокогидрофобные керамические покрытия, получаемые методом плазменного напыления порошковых материалов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2020. – Т.27, №4. – С.585-594.
- [14]. Lishen Zh., Zhou A.G., Sun B.R., Chen K.S., Yu H.-Zh. Functional and versatile superhydrophobic coatings via stoichiometric silanization // *Nature Communications*. – 2021. – Vol.12., I.982. – P.1-8.
- [15]. Нажипкызы М., Мансуров З.А. Супергидрофобные материалы и покрытия: обзор // *Горение и плазмохимия*. – 2020. – Т.18, №4. – С.163-189.
- [16]. Nazhipkyzy M., Mansurov Z., Turesheva G. Investigation of Conditions for the Creation of Hydrophobic Sand. *Materials with Extreme Wetting Properties*. Edited by Majid Hosseini, Ioannis Karapanagiotis. Springer, Cham; – 2021. – P.233-244. ISBN 978-3-030-59564-7.
- [17]. Нажипкызы М., Турганбай А. Получение гидрофобных покрытий. *Химия и химическая технология. Современные проблемы: сборник обзорных статей ученых-химиков*. – Алматы: Қазақ университеті, 2020. – Вып. 6. – 218-237 с. ISBN 978-601-04-3622-0.
- [18]. Naha S., Sen S., Puri I.K. Flame synthesis of superhydrophobic amorphous carbon surfaces // *Carbon*. – 2007. – Vol.45 – P.1696-1716.
- [19]. Johnson R.E., Dettre R.H. Contact angle hysteresis. In: Fowkes FM, Zisman WA, eds. *Contact Angle, Wettability, and Adhesion*, American Chemical Society, Washington. – 1964. – Vol.43. – P.112-135.
- [20]. Nazhipkyzy M., Pourghazian H.E., Pourghazian A.E., Mansurov Z.A., Seitkazinova A.R. Hydrophobic Carbon Soot Nanostructure Effect on the Coatings. *Materials with Extreme Wetting Properties*. Edited by Majid Hosseini, Ioannis Karapanagiotis. Springer, Cham; ISBN 978-3-030-59564-7. – 2021. – P.341-352.
- [21]. Mansurov Z.A., Nazhipkyzy M., Lesbayev B.T., Prikhodko N.G., Auyelkhanqyzy M., Puri I.K. Synthesis of Superhydrophobic Carbon Surface During Combustion Propane // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2012. – Vol. 14, №1. – P. 19-23.
- [22]. Nazhipkyzy M., Lesbayev B.T., Mansurov Z.A., Arapova A.K., Baidaulova D.K., Solovyova M.G., Prikhodko N.G. Creation based on superhydrophobic soot waterproofing materials obtained in flames // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol.535-537. – P. 1437-1440.
- [23]. Nazhipkyzy M., Mansurov Z.A., Amirfazli A., Esbosin A., Temirgaliyeva T.S., Lesbayev B.T., Aliyev E.T., Prikhodko N.G. The influence of superhydrophobic properties on the de-icing. // *Journal of Engineering Physics and thermophysics*. – 2016. – Vol.89, №6. – P.1498-1503.
- [24]. Temirgaliyeva T.S., Lesbayev B.T., Prikhodko N.G., Mansurov Z.A. Obtaining superhydrophobic sand on the basis of soot synthesized during combustion of oil waste // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol.12. – P.17-21.

- [25]. Marmur A. The lotus Effect: Superhydrophobicity and Metastability // *Langmuir*. – 2004. – Vol.20. – P.3517-3519.
- [26]. Boinovich L.B., Emelianenko A.M. (2008) Hydrophobic materials and coatings: principles of creation, properties and application // *Russian Chemical Reviews*. – 2008. – Vol.77, №7. – P.619-638.
- [27]. Myrzabaeva M., Insepov Z., Boguspaev K.K., Faleev D.G., Nazhipkyzy M., Lesbayev B.T., Mansurov Z.A. Investigation of nanohydrophobic sand as an insulating layer for cultivation of plants in soils contaminated with heavy metals // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2017. – Vol.19, №1. – P.91-98.
- [28]. Mansurov Z.A., Nazhipkyzy M., Temirgaliyeva T.S. Superhydrophobic sand on the basis of nanosoot obtained by combustion of waste oil, *Int. J. Chem. Chem. Eng. Sys.* – 2017. – Vol.2. – P.7-11.
- [29]. Камалдинова М., Рахымжан Н., Нажипкызы М., Мансуров З. Получение супергидрофобного песка для разделения водо-нефтяных смесей. *Горение и Плазмохимия*. – 2020. – Т.18, №4. – С.211-217.
- [30]. Merchan Breuer D., Murphy E., Berka B., Echeverria E, Mcllroy D.N., Merchan W. Biodiesel fumes as a unique pyrolyzing carbon source for the synthesis of hydrophobic carbon flms. *Carbon Letters*. – 2021. – Vol.31. – P.389-406.
- [31]. Нажипкызы М., Тұрғанбай А., Курманбаева Г.Г., Сейтказинова А.Р., Исанбекова А.Т. Наноөлшемді құмның ауыл шаруашылығында қолданылуы // *Вестник КазНУ*. – 2020. – №6. – С.787-792.
- [9]. Sethi SK, Manik G (2018) *Poly Plast Technol Eng* 57(18):1932–1952.
- [10]. Chermahini SH, Ostad-Ali-Askari K, Eslamian S, Singh VP (2018) *Am J Eng Appl Sci* 11(2):560–573.
- [11]. Fortin G (2017) SAE International. Unites States <https://doi.org/10.4271/2017-01-2139>
- [12]. Lin Y, Chen H, Wang G, Liu A (2018) *Coatings* 8(6):208–241.
- [13]. Gulyaev IP, Kuzmin VI, Kovalev OB (2020) Thermal physics and aerodynamics [*Teplofizika i aeromekhanika*] 27(4):585-594. (in Russian)
- [14]. Zhang L, Zhou AG, Sun BR, Chen KS, Yu H-Zh (2021) *Nature Communications*. 12(982):1-8.
- [15]. Nazhipkyzy M, Mansurov ZA (2020) Combustion and plasma chemistry [*Gorenie i plazmohimiya*] 18(4):163-189. (in Russian)
- [16]. Nazhipkyzy M, Mansurov Z, Turesheva G (2021) Edited by Majid Hosseini, Ioannis Karapanagiotis. Springer, Cham. P.233-244. ISBN 978-3-030-59564-7.
- [17]. Nazhipkyzy M., Turganbay A. (2020) Obtaining hydrophobic coatings. Chemistry and chemical technology. Contemporary problems: a collection of review articles by chemists. – Almaty: Kazakh University, 2020. – Issue. 6. – 218-237 p. ISBN 978-601-04-3622-0. (in Russian)
- [18]. Naha S, Sen S, Puri IK (2007) *Carbon* 45:1696-1716.
- [19]. Johnson RE, Dettre RH (1964) *Advances in Chemistry Series* 43:112-135. <http://dx.doi.org/10.1021/ba-1964-0043.ch007>
- [20]. Nazhipkyzy M, Esfahani PH, Esfahani PA, Mansurov ZA, Seitkazinova AR (2021) Edited by Majid Hosseini, Ioannis Karapanagiotis. Springer, Cham. P.341-352. ISBN 978-3-030-59564-7.

References

- [1]. Athauda T, Ozer R (2012) *Cellulose* 19(3):1031–1040.
- [2]. Bhushan B (2009) *Phil. Trans. R. Soc. A* 367:1445–1486.
- [3]. Celia E, Darmanin T., Taffin de Givenchy E, Amigoni S, Guittard F (2013) *J. Colloid Interface Sci.* 402:1–18.
- [4]. Crick C, Parkin I (2011) *Chem. Commun.* 47(44):12059–12061.
- [5]. Dehui Wang, Qiangqiang Sun, Matti J. Hokkanen, Chenglin Zhang and at all.n (2020) *Nature*. 582:55–59.
- [6]. Kota A, Li Y, Mabry J, Tuteja A (2012) *Adv. Mater.* 24(43):5838–5843.
- [7]. Jooyoun Kim, Seong-Ochoi (2018) *The Textile Institute Book Series*, Chapter 11:267-297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101212-3.00010-1>.
- [8]. Yildirim Erbil H, Elif Cansoy C (2009) *Langmuir* 25(24):14135–14145. DOI: 10.1021/la902098a
- [21]. Mansurov ZA, Nazhipkyzy M, Lesbayev BT, Prikhodko NG, Auyelkhanqyzy M, Puri IK (2012) *Eurasian Chemico-Technological Journal*. 14(1):19-23.
- [22]. Nazhipkyzy M, Lesbayev BT, Mansurov ZA, Arapova AK, Baidaulova DK, Solovyova MG, Prikhodko NG (2012) *Advanced Materials Research* 535-537:1437-1440.
- [23]. Nazhipkyzy M, Mansurov ZA, Amirfazli A, Esbosin A, Temirgaliyeva TS, Lesbayev BT, Aliyev ET, Prikhodko NG (2016) *Journal of Engineering Physics and thermophysics* 89(6):1498-1503.
- [24]. Temirgaliyeva TS, Lesbayev BT, Prikhodko NG, Mansurov ZA (2017) *Procedia Manufacturing* 12:17-21.
- [25]. Marmur A (2004) *Langmuir* 20: 3517-3519.
- [26]. Boinovich LB, Emelianenko AM (2008) *Advances in chemistry [Uspehi himii]* 77(7):619-638. (in Russian)

- [27]. Myrzabaeva M, Insepov Z, Boguspaev KK, Faleev DG, Nazhipkyzy M, Lesbayev BT, Mansurov ZA (2017) Eurasian Chemico-Technological Journal 19(1):91-98.
- [28]. Mansurov ZA, Nazhipkyzy M, Temirgaliyeva TS (2017) Int. J. Chem. Chem. Eng. Sys., 2:7-11.
- [29]. Kamaldinova MR, Rakhymzhan N, Nazhipkyzy M, Mansurov ZA (2020) Combustion and plasma chemistry [Gorenie i plazmochimiya] 18(4):211-217. (in Russian)
- [30]. Merchan Breuer D., Murphy E., Berka B., Echeverria E, McIlroy D.N., Merchan W. Carbon Letters 31:389-406. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00168-4>
- [31]. Nazhipkyzy M, Turganbay A, Kurmanbayeva G, Seitkazinova A, Isanbekova A (2020) Bulletin KNRTU [Vestnik KazNITU], Vestnik KazNITU 6:787-792. (in Kazakh)

Super hydrophobic materials and coatings: overview

M. Nazhipkyzy^{1,2}

¹Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Abstract

With the large exception of surfaces with reversible structures, the usual strategy for producing a superhydrophobic surface is to reduce surface energy and create surface roughness. The acquired surface has a reduced contact area between the substrate and the liquid, allowing liquid droplets to easily slide off the surface. Due to this ability to roll, such a highly rejecting surface exhibits self-cleaning characteristics. This article provides an overview on the production of nanomaterials in a flame, creation

of superhydrophobic sand based on the powder obtained from the incineration of silicone waste, anti-icing, study of the effect of hydrophobic sand on plant growth, creation of paint and varnish coatings based on hydrophobic soot.

Key words: coatings, anti-icing, hydrophobic sand, contact angle, silicone waste, incineration.

Супер гидрофобты материалдар және қаптамалар: шолу

М. Назипқызы^{1,2}

¹Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа

Қайтымды құрылымы бар беттерді қоспағанда, аса гидрофобты бетті өндірудің әдеттегі стратегиясы беттік энергияны азайту және беттің кедір-бұдырын жасау болып табылады. Алынған бетте сұйық тамшыларының беттен оңай сырғып кетуіне мүмкіндік беретін субстрат пен сұйықтықтың арасындағы байланыс аймағы азаяды. Осындай сырғу қабілетінің арқасында осындай қатты итергіш бет өзін-өзі тазарту сипаттамаларын көрсетеді. Бұл мақалада наноматериалдардың жалында алуы, силикон қалдықтарын жағудан алынған ұнтақ негізінде аса гидрофобты құм жасау, мұздануға қарсы, гидрофобты құмның өсімдіктердің өсуіне әсерін зерттеу, гидрофобты күйеге негізделген лак-бояу жабындарын жасау бойынша шолулар келтірілген.

Кілт сөздер: жабындар, мұздануға қарсы, гидрофобты құм, жанасу бұрышы, силикон қалдықтары, өртеу.